

трещиностойкости покрытий покрытиями / Ф.И. Пантелеенко, А.С. Снарский // Сб. трудов Международной НТК «Материалы для работы в экстремальных условиях-2». – Киев: НТУУ, 2009. – С. 106–109.

4. Безлюдько, Г.Я. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций / Г.Я. Безлюдько, В.Ф. Мужичкий, Б.Е. Попов // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. – 1999. – № 9, т. 65. – С. 53–57.

5. Пантелеенко, Ф.И. Методология выявления слабых, критических мест сосудов, работающих под давлением покрытиями / Ф.И. Пантелеенко, А.С. Снарский // Сб. научных трудов VII Международной НТК: в 3 т. / под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополюк: ПГУ, 2009. – Т. 3. – С. 78–81.

6. Пантелеенко, Ф.И. Концепция системы неразрушающего контроля и оценки потенциальной надежности и безопасности ответственных изделий / Ф.И. Пантелеенко, А.С. Снарский // Сб. научных трудов Международной НТК «Инженерия поверхностного слоя деталей машин». – Кемерово: КузГТУ, 2009 – С. 312–318.

УДК 620.17: 621.79

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д-р. техн. наук,
А.С. СНАРСКИЙ, канд. техн. наук,
В.А. ПИСАРЕВ (БНТУ),
А.В. КРЫЛЕНКО, канд. техн. наук (ОАО «НАФТАН»)

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЯ НА КРАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПОСЛЕ ИХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Одной из основных причин разрушений металлоконструкций грузоподъемных кранов является деградация и старение металла, в первую очередь, сварных соединений, определяющих эксплуатационные характеристики крана [1]. Изменение физико-механического состояния металла при длительной эксплуатации, его старение и охрупчивание под воздействием ряда факторов, в том числе за счет

знакопеременных циклических нагрузок и термоциклирования, происходят как в основном металле, так и в сварных соединениях (как правило, в зоне термического влияния), что приводит к снижению надежной и безопасной работоспособности всей конструкции. В связи с этим контроль свойств металла и его текущего состояния имеет важнейшее значение при оценке возможности эксплуатации различных конструкций и объектов, в том числе кранов [1], как характерного представителя ответственных сварных металлоконструкций.

Одним из направлений решения поставленных вопросов является проведение научных исследований и разработка системы и методики диагностики, позволяющей обеспечить объективный мониторинг состояния сварных соединений и металла кранов с прогнозированием и продлением сроков эксплуатации крановой техники, гарантированно обеспечивая при этом необходимый уровень надежности и безопасности.

Были разработаны основные элементы методики оценки фактического состояния и степени деградации сварных соединений и основного металла грузоподъемных кранов по результатам анализа существующих методик контроля, технической диагностики и оценки остаточного ресурса металлоконструкций с адаптацией выбранных элементов для работы с крановыми конструкциями.

Апробацию разработанных технологических приемов и методов на крановых конструкциях проводили на строительных объектах и ремонтном участке ОАО «Управление механизации № 79» (г. Минск).

Установлено, что для объективной оценки состояния металлоконструкций целесообразно применять комплексную методику, включающую несколько методов, в том числе: магнитный (коэрцитиметрический), дюрометрический и металлографический методы.

Остановимся на них более подробно с учетом особенностей объекта исследований – крановой конструкции. Все приведенные ниже методы контроля относятся к неразрушающим методам, позволяющим непосредственно на конструкции без вырезки образцов, определять фактическое состояние металла в любом доступном месте диагностируемой конструкции.

Магнитный (коэрцитиметрический) метод основан на возможности определения фактического уровня напряженно-

деформированного состояния металла по значению коэрцитивной силы [2]. Для ряда сталей установлены максимально допустимые значения коэрцитивной силы, соответствующие пределу текучести конкретного материала. Таким образом, если фактическое значение, определенное на конструкции, превышает указанное значение, то эксплуатация конструкции запрещается (по уровню внутренних напряжений, превышающих предел текучести). Для проведения указанных работ использовали серийно выпускаемый магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М (НПФ «Специальные научные разработки» г. Харьков).

ДюрOMETрический метод (метод косвенного определения механических свойств материала) основан на возможности определения характеристик механических свойств: предела прочности, предела текучести, относительного удлинения и сужения, а также ударной вязкости по параметрам пирамидального отпечатка на поверхности материала после определения твердости по Виккерсу [3-5].

Расчетные уравнения для определения механических свойств:
предел прочности σ_B :

$$\sigma_B = HV(0,285 + 0,057kS), \text{ МПа};$$

относительное удлинение δ_5 :

$$\delta_5 = D \cdot k(9,38 + 24,43kS), \text{ \%};$$

относительное сужение ψ :

$$\psi = 16,4 + 80kS, \text{ \%};$$

ударная вязкость КСЧУ:

$$\text{КСЧУ} = \gamma \frac{\psi}{1 - \psi}, \text{ МДж/м}^2,$$

где HV – среднеарифметическое значение твердости, определенной по Виккерсу; k – коэффициент кратности, зависящий от нагрузки на пирамидальный индентор, для нагрузки 50 Н $k = 4,472$; D – диагональ отпечатка, мм; S – ширина отпечатка, мм; γ – коэффициент, зависящий от уровня механических свойств материала (при $\psi > 80$,

$60 < \psi \leq 80$, $40 < \psi \leq 60$, $20 < \psi \leq 40$, $\psi \leq 20$ коэффициент γ соответственно равен 0,61, 0,76, 0,83, 1,19, 1,66).

При этом за счет применения переносных твердомеров указанные характеристики можно определить практически в любой точке диагностируемой конструкции. Если полученные значения указанных механических свойств не соответствуют допустимому уровню значений для данной стали, следует выполнять отбраковку с последующим ремонтом.

Металлографический метод основан на возможности контроля особенностей и аномалий структуры, а также возможности косвенного определения механических свойств. Один из методов основан на возможности косвенного определения механических свойств по наличию и форме субзерен феррита [6]. Установлено, что для феррито-перлитных сталей (на примере сталей Ст3 и Ст4) при их эксплуатации при циклических нагрузках (что важно и для крановых конструкций) наблюдаются изменения в зернах феррита: чем больше циклов или выше напряжения, тем нагляднее в микроструктуре проявляются субзерна феррита. Указанные изменения легко выявляются микроскопическим исследованием, в том числе при применении переносного микроскопа, и свидетельствуют о степени деградации металла, и соответственно его механических свойств (таблица 1).

Таблица 1– Связь механических свойств стали со структурой феррита [6]

Тип структур	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, Дж/см ²
Исходная	268	430	26	185
Ячеистая	250	450	24	157
Фрагментированная с «ножевыми» границами	298	560	18	78

Как видно из таблицы, связь структуры со свойствами однозначна. Возникновение ячеистой структуры феррита уже свидетельствует о деградации металла и снижении, в первую очередь, ударной вязкости примерно на 15–20 %.

Отработку указанных методов оценки степени деградации металла для башенных кранов выполняли на металле стрелы башенного крана С-981, материал: сталь ВСтЗсп5. Стрела была выведена из эксплуатации по причине значительного коррозионного износа из-за длительного срока эксплуатации (более 20 лет).

Необходимо было решить следующие задачи:

- установление объективности оценки напряженного состояния металла коэрцитивным методом, его чувствительности и возможности использования при диагностики кранов;

- установление влияния уровня напряженными состояниями металла на степень его деградации;

- подтверждение возможности косвенной оценки уровня механических свойств металла и степени его деградации по параметрам отпечатка при определении твердости по Виккерсу по разработанному способу [3–5];

- установление эффективного критерия отбраковки металла (по уровню коэрцитивной силы или по уровню механических свойств, определенных косвенным способом), с учетом допущения, что при низком допустимом уровне коэрцитивной силы (внутренних напряжений) возможна высокая степень деградации металла и снижение механических свойств ниже установленных допустимых значений.

На первом этапе была выполнена разметка крановой конструкции с указанием мест замера коэрцитивной силы. На несущих элементах стрелы (уголок, нижний пояс) применялся шаг замера 1 м, также выполнялись замеры по сварным швам нижнего пояса с поперечинами (рисунок 1).

Было выполнено 30 замеров коэрцитивной силы и установлены точки с максимальным и минимальным значением коэрцитивной силы, что соответствует максимальному и минимальному уровню напряжений в конструкции. Максимальное значение составляло 5,3 А/см для металла поперечины (уголок); минимальное значение – 2,4 А/см для металла несущего элемента стрелы (уголок, нижний пояс).



Рисунок 1 – Внешний вид элемента диагностируемой крановой конструкции (стрелы) с разметкой

Проведено изучение металла на контрольных участках и определены механические свойства: участок № 1 – металл с максимальным значением коэрцитивной силы, что соответствует максимальному уровню напряжений в конструкции; участок № 2 – металл с минимальным значением коэрцитивной силы, что соответствует минимальному уровню напряжений в конструкции.

Предполагалось, что степень деградации металла на участке № 1 будет выше, чем на участке № 2 (также предположительно считалось, что будет ниже ударная вязкость и пластичность).

На поверхности конструкции в местах, выбранных для проведения контроля, шлифовались участки диаметром 25–35 мм. В качестве инструмента для шлифования и полирования поверхности материала использовался переносной шлифовально-полировальный станок «Аккорол 2.2» (рисунок 2). Зачищенная поверхность шлифовалась несколькими насадками с последовательно убывающей зернистостью шлифовальной бумаги от 80 до 1200. Полирование поверхностей производилось механическим способом. При этом использовался полировальный круг с алмазной пастой.



Рисунок 2 – Переносной шлифовально-полировальный станок «Аkkropol 2.2», использованный для подготовки поверхности образцов

Определение твердости по методу Виккерса проводили с помощью переносных твердомеров Microdur I, Microdur II (резонансно-импедансного принципа действия) и WPM (статического принципа действия) (рисунок 3). Твердость по Виккерсу измерялась алмазной пирамидой с углом между противоположными гранями 136° при нагрузке на индентор 50 Н.



a



б

a – твердомер Microdur I; *б* – твердомер Microdur II

Рисунок 3 – Переносные твердомеры, использованные для измерения твердости по Виккерсу материала

Параметры формы пирамидального отпечатка (ширина и диагональ) измерялись в двух взаимно перпендикулярных направлениях с использованием окуляр-микрометра на переносном металлографическом микроскопе ТКМ при увеличении $\times 400$.

Типичные отпечатки, получаемые на материале при измерении твердости по Виккерсу (получены с помощью цифрового фотоаппарата, совмещаемого с окуляром микроскопа), приведены на рисунке 4.

Полученные экспериментальные результаты представлены ниже.

Участок 1 – металл с максимальным значением коэрцитивной силы ($H_{a \max} = 5,3 \text{ A/cm}$), что соответствует максимальному уровню напряжений в конструкции.

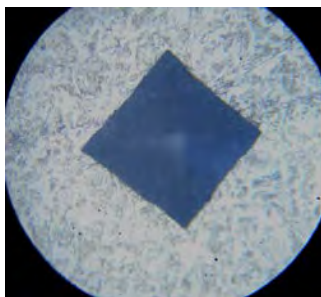


Рисунок 4 – Пирамидальные отпечатки на материале, полученные при измерении твердости по Виккерсу (нагрузка 50 Н), $\times 400$

Типичная микроструктура металла на участке 1 (рисунок 5) – феррит (крупные светлые зерна) состоит из более мелких субзерен-ячеек.

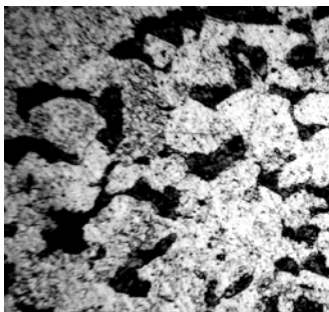


Рисунок 5 – Типичная микроструктура металла стрелы крана в месте максимального значения коэрцитивной силы (участок 1), $\times 400$

Средние значения параметров формы отпечатков (по результатам 10 измерений): HV (твёрдость) = 1426 МПа; D (диагональ отпечатка) = 0,2396 мм; S (ширина отпечатка) = 0,1692 мм.

Механические свойства:

$$\sigma_a = 1426(0,285 + 0,057 \cdot 4,472 \cdot 0,1692) = 467,9 \text{ МПа} ;$$

$$\delta_5 = 0,2396 \cdot 4,472(9,38 + 24,43 \cdot 4,472 \cdot 0,1692) = 29,8 \% ;$$

$$\psi = 16,4 + 80 \cdot 4,472 \cdot 0,1692 = 76,9 \% ;$$

$$KCU = 0,76 \cdot \frac{0,769}{1 - 0,769} = 2,53 \text{ МПа/мм}^2 = 253 \text{ МПа/мм}^2.$$

Участок 2 – металл с минимальным значением коэрцитивной силы ($H_{a \text{ min}} = 2,4 \text{ А/см}$), что соответствует минимальному уровню напряжений в конструкции.

Типичная микроструктура металла на участке 2 представлена на рисунке 6: в феррите (крупные светлые зерна) явных ячеистых субзерен не наблюдается.

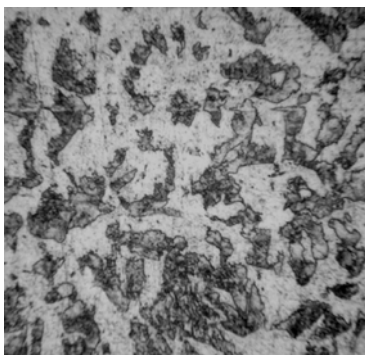


Рисунок 6 – Типичная микроструктура стрелы крана в месте минимального значения коэрцитивной силы (участок 2), $\times 400$

Средние значения параметров формы отпечатков (по результатам 7 измерений): $HV = 1346 \text{ МПа}$; $D = 0,2422 \text{ мм}$; $S = 0,1735 \text{ мм}$.

Механические свойства:

$$\sigma_a = 1346(0,285 + 0,057 \cdot 4,472 \cdot 0,1735) = 443,12 \text{ МПа};$$

$$\delta_5 = 0,2422 \cdot 4,472(9,38 + 24,43 \cdot 4,472 \cdot 0,1735) = 30,7 \%;$$

$$\psi = 16,4 + 80 \cdot 4,472 \cdot 0,1735 = 78,4 \%;$$

$$KCU = 0,76 \frac{0,76}{1 - 0,76} = 2,7 \text{ МПа/мм}^2 = 270 \text{ МПа/мм}^2.$$

Обобщенные экспериментальные данные сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Данные по анализу металла крановой конструкции

Параметр	Участок 1	Участок 2	Разница между параметрами, раз*
Коэффициентная сила, А/см	5,3 (max)	2,4 (min)	2,2
Уровень внутренних напряжений в металле	максимальный	минимальный	–
Твердость, НВ	142,6	134,6	1,059
Предел прочности, МПа	467,8	443,12	1,056
Относительное удлинение, %	29,8	30,7	1,030
Относительное сужение, %	76,9	78,4	1,020
Ударная вязкость, Дж/см ²	253	270	1,067
* – получено путем деления максимального на минимальное значение одного и того же параметра			

На основании анализа экспериментальных данных сделаны следующие выводы:

1. Определенные косвенным путем значения всех механических свойств для участков 1 и 2 не ниже минимальных (отбраковочных) значений для стали ВСт3.

2. Установлен более высокий уровень деградации металла на участке 1, т.к. он находился под большим напряжением при эксплуатации, чем участок 2 (характерно снижение ударной вязкости на 6,7 % и пластичности (по относительному удлинению) на 3,0 %).

3. Наиболее чувствительным параметром к уровню деградации металла (по результатам проведенных исследований на элементах стрелы башенного крана) является коэрцитивная сила (разница между контрольными участками составляет 220 %).

Таким образом, приведенные выше экспериментальные данные по анализу металла крановой конструкции показывают эффективность именно комплексной методики контроля фактического состояния металла диагностируемой конструкции.

При этом разработанный метод косвенной оценки фактических механических свойств металла по параметрам полученного пирамидального отпечатка также доказал свою работоспособность и эффективность с позиции возможности определения характеристик механических свойств непосредственно на конструкции и без ее «травмирования».

Применение указанных методов при техническом диагностировании позволит более объективно судить о фактическом состоянии металла, уровне его механических свойств, а также проводить отбраковку элементов конструкции для своевременного ремонта.

Литература

1. **Станкевич, В.И.** Так чем грузы поднимать? / В.И. Станкевич // Промышленная безопасность. – 2006. – № 5. – С. 38–39.

2. **Безлюдько, Г.Я.** Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций / Г.Я. Безлюдько, В.Ф. Мужичкий, Б.Е. Попов // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. – 1999. – № 9, т. 65. – С. 53–57.

3. **Снарский, А.С.** Методы определения механических свойств металла оборудования и конструкций / А.С. Снарский, А.В. Крыленко // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2002. – № 2, т. 1. – С. 57–62.

4. **Снарский, А.С.** Установление закономерности деградации механических свойств металла нефтехимического оборудования и конструкций / А.С. Снарский, А.В. Крыленко // Вестник Полоцкого гос. ун-та. – 2004. – № 3. – С. 44–49.

5. **Снарский, А.С.** Определение физико-механических характеристик материала методом неразрушающего контроля / А.С. Снар-

ский, А.В. Крыленко // Вестник Полоцкого гос. ун-та. – 2005. – № 10. – С. 133–137.

6. Назарова, Н.М. Исследование механизмов релаксации внутренних напряжений в стенке резервуара и их влияния на развитие процессов разрушения / Н.М. Назарова: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Н.М. Назарова. – Уфа: УГНТУ, 2000. – 24 с.

УДК [669.14:001.891.5]:519.2

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д-р техн. наук,
Е.С. ГОЛУБЦОВА, д-р техн. наук (БНТУ)
Н.Б. КАЛЕДИНА (БГТУ)

ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Обеспечение несущей способности конструкций или детали может быть достигнуто различными способами – легированием, способом выплавки стали, термообработкой и др., причем свойства стали могут существенно изменяться даже от плавки к плавке.

В данной работе рассматривалось влияние пяти факторов (содержание Nb, C, Mn, и Si, плавки А и В) на такие параметры оптимизации, как предел текучести ($y_1 = \sigma_0$, МПа); энергия разрушения ($y_2 = W_c$, МДж/м³), коэффициент вязкости разрушения ($y_3 = K_{Ic}$, МПа·м^{0,5}), L -критерия (y_4) и обобщенного показателя D (y_5) с целью повышения прочностных и пластических свойств стали.

Для проведения эксперимента был выбран дробный факторный план $N = 2^{5-2}$, где N – число опытов (строк в матрице плана), 5 – число факторов, 2 – число уровней факторов и два незначимых взаимодействия факторов, вместо которых вводятся факторы $x_5 = x_1 x_2 x_3$ и $x_4 = x_2 x_3$.